



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Gestión óptima de la vegetación bajo líneas eléctricas: algoritmo VEGETA

ÁVILA OLLERO, J. M.³, DÍAZ ROMERO, M.¹, LÓPEZ LÁZARO, J.², MARTÍNEZ LÓPEZ, G.³, OÑORO MEDRANO, N.¹, ORTEGA GONZÁLEZ, D.⁴, ROMERO MIRALLES, A.², RODRÍGUEZ PEÑA, J. F.², RUIZ CAPIILLA, D.², SÁNCHEZ SERRANO, F.¹, SOLANO ALBARES, T.², TEJEDOR ESCOBAR, P.² y VEIRAS LENZ, I.⁴.

¹ Tecnologías y Servicios Agrarios. S.A., S.M.E. M.P. (TRAGSATEC).

² Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería del Conocimiento (ADIC).

³ Red Eléctrica de España, S.A.U. (REE).

⁴ Elewit.

Resumen

REE y Elewit con la colaboración de TRAGSATEC y del IIC han desarrollado e implementado el algoritmo matemático VEGETA, que fija un plan de gestión óptima de ciclos de tratamiento en diferentes escenarios con objeto de reducir al máximo la ocurrencia de incendios o de cualquier accidente que pueda afectar a la seguridad de la línea.

El algoritmo consta de un componente técnico y otro optimizador que interactúan entre ellos. El primero predice la prioridad de actuación bajo las líneas a escala celda (georreferenciada), en función de la vegetación y de su potencial crecimiento, garantizando el cumplimiento de los requisitos legales ambientales y eléctricos y la minimización de riesgos. El segundo analiza todos los escenarios posibles en una zona, según se actúe o no en ella en los siguientes años, y calcula qué actuaciones en cada año permiten incurrir en costes mínimos, manteniendo el cumplimiento normativo.

El resultado es una aplicación programada en *Python* que identifica dónde, cuándo, cómo y por qué actuar optimizando los costes en el ciclo. También ayuda a decidir qué actuaciones minimizan los riesgos si el presupuesto es limitado, y estudia qué trabajos pueden adelantarse según el orden idóneo para disminuir costes.

Palabras clave

Planificación, herramienta, optimización, prioridad, tratamiento, vaso eléctrico, celda, parametrización, configuración, escenario, datos masivos, incendio forestal, cartografía de vegetación.

1. Introducción

Red Eléctrica de España (en adelante REE) lleva años realizando tratamientos selvícolas bajo las líneas eléctricas de su propiedad con el fin de reducir al máximo la ocurrencia de un incendio, así como de prevenir cualquier accidente que pueda afectar a la seguridad de la línea.

REE venía ejecutando estos trabajos anualmente en función de las necesidades y en base a la normativa vigente, pero sin una gestión técnica y económica unificada. Además, los tratamientos ejecutados no estaban geolocalizados, por lo que resultaba complicado hacer un seguimiento digital de los mismos.

La necesidad de planificar y optimizar los trabajos de mantenimiento de la vegetación automáticamente, y de poder identificar y georreferenciar dichas actuaciones; han llevado a REE y a Elewit –la plataforma tecnológica del Grupo Red Eléctrica- a implementar el denominado algoritmo VEGETA con la colaboración de TRAGSATEC y del Instituto de Ingeniería del Conocimiento (IIC).

El desarrollo del algoritmo comenzó a finales de 2015 como un proyecto de I+D+i piloto en Galicia y Extremadura, para convertirse en 2018 en un proyecto de producción para su desarrollo, validación e implantación en el resto de España.

2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto ha sido por tanto el diseño y la implementación de un algoritmo de cálculo propiedad de REE que permite establecer un programa de actuaciones de forma automática a partir de información sobre la vegetación existente y de información relacionada con los conductores y las líneas, cargada de forma masiva. En definitiva, se trata de conseguir la optimización a futuro de las operaciones de tratamiento de la vegetación (talas, podas y desbroces) que crece en las inmediaciones de los circuitos eléctricos de REE.

Como objetivos derivados del objetivo principal, con el desarrollo de este algoritmo se pretende asimismo:

- Priorizar actuaciones en función de requisitos legales, técnicos y económicos.
- Obtener una herramienta flexible que permita que las variables de cálculo y los datos masivos de entrada puedan ser actualizados por el usuario.
- Generar planes de actuación optimizados de acuerdo a diferentes configuraciones iniciales y escenarios.
- Diseñar una aplicación que funcione de manera independiente y como componente interno del sistema interno de REE, MANINT, y que corra en tiempo mínimo.

3. Metodología

Con el reto de cumplir estos objetivos, el algoritmo VEGETA está concebido como integración de dos componentes que se concatenan, el componente técnico y el componente optimizador, y proporciona un plan de trabajos optimizado a 4 años. Este periodo de 4 años es el que se ha considerado idóneo para poder hacer una primera planificación de trabajos y dotaciones presupuestarias a corto plazo. Sin embargo, ello no se traduce en que este plan sea estanco. Al contrario, el algoritmo puede ser ejecutado y actualizado en cualquier momento con nuevos datos, ya sea con datos de actuaciones reales ejecutadas a lo largo del ciclo, o con nuevos datos de las variables de entrada actualizados masivamente. De este modo, se consigue disponer siempre del mejor dato, y al volver a correr la simulación, permite realizar un correcto seguimiento de los trabajos, y definir los ajustes necesarios a la planificación inicial en virtud de las desviaciones existentes.

Componente técnico del algoritmo VEGETA

El componente técnico realiza una predicción de en qué lugares se considera que se debe actuar antes de 1, 2, 3 y 4 años, así como de los requisitos técnicos por los que es necesario la actuación en esos años (lo que se ha denominado como prioridades y subprioridades), y del tratamiento correspondiente. Para ello el componente técnico opera con diferente tipología de información como:

- mediciones del terreno (pulsos LIDAR, pendiente, afloramientos rocosos...),
- información sobre atributos de la vegetación,
- legislación propia de cada comunidad autónoma y convenios de colaboración firmados entre las administraciones y REE,
- requisitos de distancias determinados por el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT,
- y otros requisitos propios de REE.

El componente técnico se descompone a su vez en cálculo de anomalías y cálculo de prioridades, y ambos procesos interactúan iterativamente a lo largo de los 4 años, dado que por ejemplo el cálculo de anomalías del año 2 necesita saber qué celdas se pretenden tratar en el año 1.

Los flujos de proceso definidos a partir de la información de entrada, e implementados a través de procesos de cálculo y de decisión, posibilitan el cálculo automático de anomalías, de la

prioridad de actuación y de la subprioridad, así como del tipo de tratamiento (tala, poda o desbroce) correspondiente a nivel de celda.

En efecto, estos lugares que se etiquetan como a tratar durante los años 1, 2, 3 y 4 son **celdas** cuadradas de 5m x 5m que REE tiene definidas y georeferenciadas en forma de rejilla formando una **malla** a lo largo de las diferentes líneas y a lo ancho de corredores o calles que recorren toda su longitud. Dicho de otro modo, existen unos pasillos desde el inicio hasta el final de cada línea que cubren un ancho determinado a izquierda y derecha de los cables (típicamente del orden de 100 m), divididos siempre en cuadrados de 5m x 5m.

A su vez, existe una subdivisión de estos pasillos conocidos como **vanos**, que se corresponden con los diferentes tramos que hay entre torres o apoyos. Es decir, se entiende como vano el conjunto de celdas que conforman la calle entre 2 puntos de apoyo del cableado de una determinada línea.

Por último, las celdas se clasifican también en función de su posición dentro del vano, según en qué **zona reglamentaria** (Figura 1) y **zona de desbroce** se ubican. Las primeras se definen en función de las diferentes zonas de protección y conservación de la línea, y las segundas son zonas creadas en VEGETA para dar respuesta a la legislación en relación con la cobertura de vegetación.

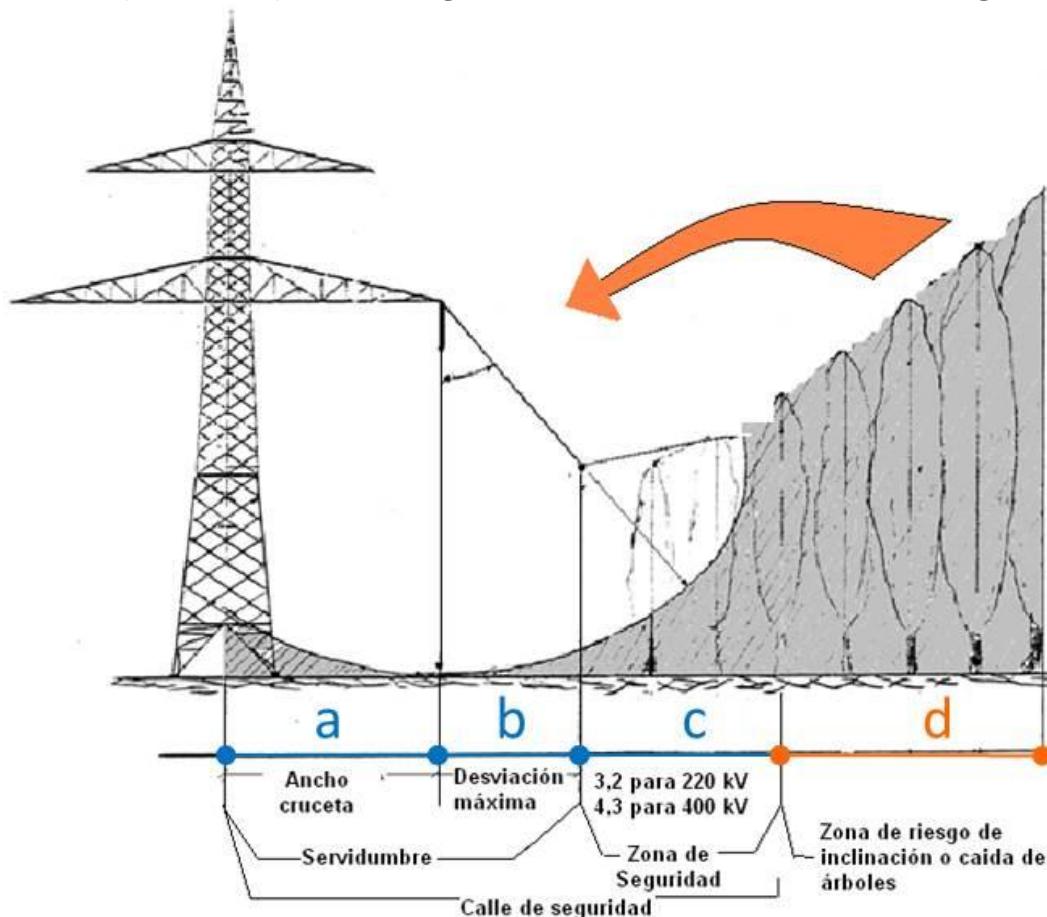


Figura 1. Zonas reglamentarias.

El **cálculo de anomalías** comprende la actualización de alturas de vegetación y distancias entre vegetación y conductores y el cálculo de anomalías (incumplimiento de distancias) según Reglamento a partir de estos datos. La actualización de las distancias se realiza tras la actualización de altura de la vegetación, tanto al inicio del plan como a partir de la altura de la vegetación establecida por el propio algoritmo para los años 2, 3 y 4.

En la actualización de las alturas y distancias al inicio del plan se tienen en cuenta dos fechas, la fecha a la que corresponde el dato de la altura de vegetación seleccionado como fuente de esta información, y la fecha T0, que debe ser introducida a través de la interfaz de MANINT (parámetro obligatorio de entrada por la API).

Por su parte, las alturas y distancias al inicio de cada año dentro del plan vendrán en función de los tratamientos ejecutados sobre la vegetación y los incrementos de altura asociados a la vegetación existente en cada momento.

Una vez recalcadas las distancias entre conductor y vegetación se calculan las anomalías reglamentarias, comprobando si se encuentran entre las distancias mínimas y máximas establecidas en cada uno de los casos (tensión e hipótesis) que estipula el Reglamento.

El **cálculo de prioridades** determina entonces la prioridad en cada celda en términos de años del plan, y la **subprioridad**, jerarquizada y excluyente, que indica el criterio que genera la prioridad:

- **SUBPRIORIDAD=A1:** por criterio de anomalía de reglamento; para el cumplimiento de distancias de seguridad entre la vegetación y los conductores en diferentes hipótesis.
- **SUBPRIORIDAD=A2:** por criterio de altura máxima de especies; para el cumplimiento de requisitos legales relacionados, o bien con presencia bajo la línea de especies vegetales no compatibles, o bien con la altura máxima de las especies.
- **SUBPRIORIDAD=A3:** por criterio de fracción de cabida cubierta; para el cumplimiento de requisitos legales relacionados con una cobertura máxima de vegetación.
- **SUBPRIORIDAD=A4:** por criterio de riesgo de incendio; para minimizar el riesgo de propagación de incendios.

Para calcular estas subprioridades en los 4 años del plan, el algoritmo realiza una estimación de cómo va a evolucionar la vegetación. Para ello resulta fundamental dotarlo de una sólida base técnica y de datos de entrada fiables y de máxima actualidad.

En efecto, para alimentar el algoritmo VEGETA es preciso disponer de datos de **vuelo Lidar** (proporcionado por REE) con datos de altura y fracción de cabida cubierta de la vegetación y de distancias, a escala celda. Estos datos son imprescindibles para el cálculo de anomalías y de subprioridades, y deben ser renovados periódicamente.

Así mismo, en el marco del proyecto se ha generado la **cartografía VEGETA**, cartografía de detalle de vegetación del ámbito de influencia de las líneas de alta tensión de REE, que consta de dos productos:

- **Mapa Forestal de Red Eléctrica de España, MFREE:** Es un mapa a escala tesela (unidad espacial del terreno que presenta una ocupación de suelo con estructura homogénea), obtenido por fotointerpretación sobre ortofoto PNOA. Consta de un modelo de datos que recoge todos aquellos atributos necesarios para la obtención del estrato de vegetación y del modelo de combustible asociado.
- **Cartografía VEGETA:** Es un mapa a escala tesela generado a partir del MFREE, de Modelo Digital del Terreno (MDT) con resolución 2 m de celda, de datos del Inventario Forestal Nacional y otras fuentes contrastadas. Consta de un modelo de datos específico, con las variables requeridas para alimentar al algoritmo VEGETA.

La cartografía VEGETA se vuela inicialmente sobre la malla de celdas de 5m x 5m, y su integración con los datos del vuelo Lidar y datos de identificación de la celda generan la denominada tabla **Tb_malla** de alimentación del algoritmo. Una vez generada, la cartografía VEGETA queda como una foto fija de la vegetación, y es esta tabla Tb_malla a escala celda la que es actualizada si se cuentan con nuevos datos de alimentación.

La información proporcionada por la cartografía VEGETA permite inferir a nivel de celda el incremento de crecimiento anual de las especies presentes bajo la línea y otras variables relacionadas, como la capacidad de rebrote de las especies, la altura máxima que pueden alcanzar, etc. Estas variables condicionan la simulación de la evolución de la vegetación en función de las actuaciones a lo largo del plan.

En concreto, el crecimiento anual de la vegetación resulta determinante para simular esta evolución. Para la estimación del incremento de altura del arbolado para cada comunidad autónoma

se han utilizado los datos del Inventario Forestal Nacional (IFN4 - IFN3, o IFN3 – IFN2 en provincias que todavía no disponen de IFN4), calculando la diferencia de altura pie a pie de las parcelas, dividiendo por el periodo entre inventarios, y determinando las medias por estratos propios definidos según especie, estado de masa y fracción de cabida cubierta arbolada. Así, los estratos se definen de forma que los árboles de la muestra pertenezcan al menos a 5 parcelas distintas del IFN, y que el error sea menor al 15%. En los casos en que el error es más elevado, se tantean nuevas agrupaciones, pero siempre procurando calcular el crecimiento de las diferentes especies sin “contaminar” otras. Por su parte, para calcular el crecimiento del matorral se han utilizado datos empíricos de ensayos de campo realizados por la empresa TRAGSA y ecuaciones de variación de la altura en función de la edad desarrolladas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) en la publicación MONTERO, G.; LÓPEZ LEIVA, C.; RUIZ PEINADO, R.; LÓPEZ-SENEPLEDA, E.; ONRUBIA, R.; PASALODOS, M. 2020. Producción de biomasa y fijación de carbono por los matorrales españoles y por el horizonte orgánico superficial de los suelos forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1-256. Madrid.

En el componente técnico participan igualmente otros criterios o variables que condicionan en sí mismos la subprioridad y el tratamiento a asignar a las celdas, como son la presencia de especies compatibles o no compatibles con la línea (según dictan la legislación o los convenios de colaboración entre REE y las administraciones), el grado de protección de las especies, la existencia de vegetación de ribera, el riesgo de incendio (calculado por el algoritmo en función de la pendiente, el modelo de combustible y el riesgo meteorológico), la posición de la celda en el vano, o la distancia de la vegetación a los cables (por ejemplo en vaguadas).

Todas las variables se implementan en el algoritmo particularizadas por comunidad autónoma. Al estar parametrizadas, cualquier modificación de las variables puede ser actualizada para correr el algoritmo con los nuevos valores. Ello posibilita hacer simulaciones variando los parámetros para analizar el impacto de determinadas restricciones en los planes de trabajo.

El proceso que sigue el componente técnico es un proceso secuencial que se realiza para cada año del plan y que automáticamente actualiza los datos de las celdas al año siguiente.

Al inicio del primer año, el algoritmo realiza unos procesos previos de actualización automática, como son la actualización de la altura de vegetación y la resolución de incoherencias entre los datos de altura procedentes de Lidar y los atributos relativos a vegetación informados; si bien externamente al algoritmo REE ha implementado un exhaustivo sistema de actualización y control de coherencia de datos para que los errores o incoherencias sean nulos o mínimos al entrar al algoritmo VEGETA.

Seguidamente comienza la ejecución del componente técnico del algoritmo que se repite todos los años del ciclo para asignar prioridades, subprioridades y el **tipo de tratamiento (poda, tala o desbroce) en cada celda (Figura 2)**. El tipo de tratamiento depende tanto de los requerimientos legales y técnicos como de condicionantes particulares (celdas con algún tipo de incidencia informada entre otros). En el caso de subprioridad por anomalía de reglamento, si el tratamiento asignado es el de poda por ejemplo, el algoritmo calcula la altura a la que se ha de realizar para que no vuelva a producirse anomalía por distancias dentro de los cuatro años siguientes.

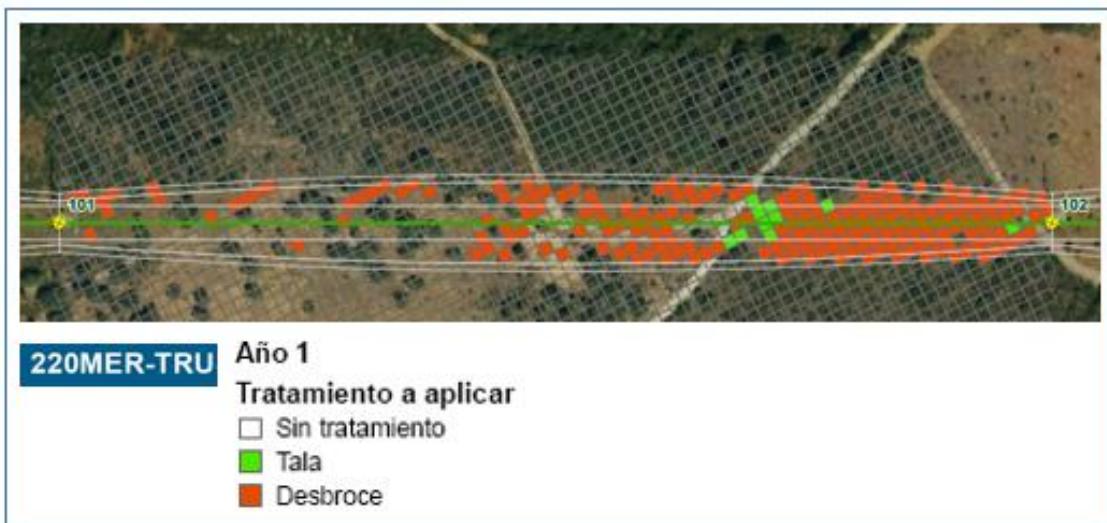


Figura 2. Tipo de tratamiento asignado por el componente técnico en el Año 1.

Al final de cada año se ejecuta la actualización de variables en aquellas celdas con subprioridad A1 a A4 en función de lo potencialmente tratado. En efecto, para poder generar la planificación de actuaciones por celda, el componente técnico simula que cada año se actúa en todas las celdas con subprioridad A1 a A4 y tratamiento asignados en el año, y actualiza aquellos campos de información que pueden verse modificados al año siguiente.

Componente optimizador del algoritmo VEGETA

La idea general del optimizador es la de ahorrar costes, a costa de no realizar las actuaciones que indica el componente técnico algunos años, o anticipándose a las actuaciones que indica dicho componente técnico porque resulte un plan más económico. Como se ha descrito anteriormente el componente técnico estima cómo va a evolucionar la vegetación en los siguientes 4 años, y predice en qué lugares se considera que se debe actuar y por qué motivos. Por consiguiente, es necesario responder a la pregunta de qué sucedería en caso de que no se hiciera necesariamente todo lo que indica el técnico entre el año A y el año A+1. Para resolver esta problemática se define un módulo simulador de actuaciones (Figura 3).

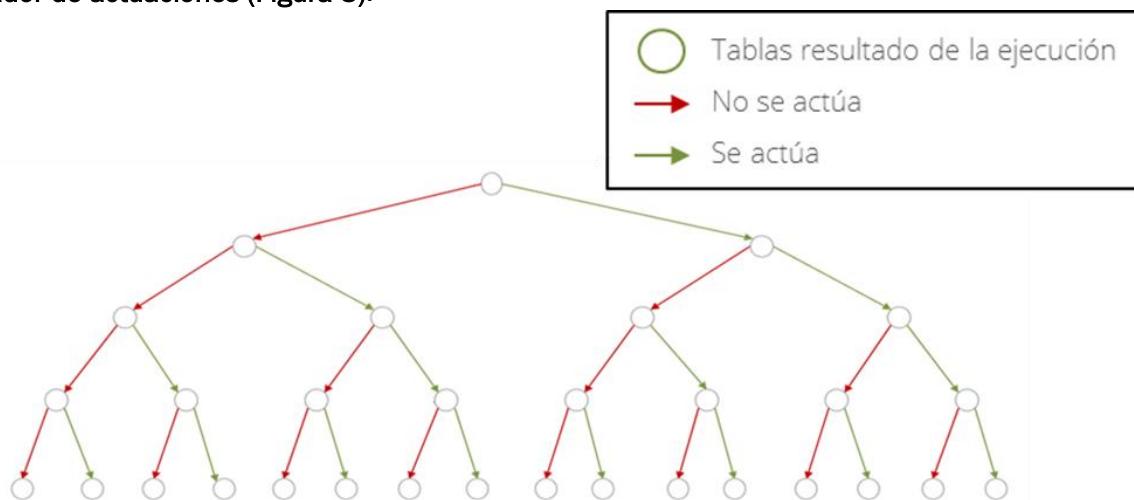


Figura 3. Simulador de actuaciones.

El simulador lleva a cabo las 16 posibles situaciones que pueden existir en una zona según se actúe o no en ella. Es decir, toma decisiones binarias a lo largo de los cuatro años de “ir” (y hacer lo que correspondería según el estado de la vegetación en ese momento) o “no ir”.

La enorme casuística que supone este problema, 16 escenarios para decenas de millones de celdas en España, hace que sea imposible computacionalmente atender a una optimización a nivel de celdas. Por otro lado, optimizaciones a niveles de agregación mayores, como a nivel de vano, presentan la problemática de agrupar zonas con actuaciones demasiado distintas entre sí. Además, optimizar a nivel de vano provocaría demasiada rigidez para que el optimizador reparta paquetes de trabajo.

La solución adoptada para resolver este conflicto es la definición de las denominadas **zonas de optimización**, de tamaño intermedio entre las celdas y los vanos. En concreto, las zonas de optimización se definen como la intersección entre los recintos delimitados por la cartografía VEGETA y cada uno de los vanos. De esta manera los vanos se dividen de media en unas 8 zonas de optimización, que además al estar definidas mediante los recintos forestales tendrán en principio una vegetación con estructura homogénea y, por tanto, es de esperar que reciban un tratamiento similar cuando se decida ir a tratarlas.

Estas zonas de optimización están compuestas por un conjunto de celdas, y son éstas las que tienen la información del componente técnico sobre qué tipo de actuación convendría realizar. A partir entonces de las celdas que conforman una zona de optimización, de los tratamientos asignados a esas celdas, de los costes de realización de dichos tratamientos, de las restricciones presupuestarias y de las implicaciones que tiene “ir” o “no ir” a realizar esos tratamientos, el optimizador toma la decisión zona por zona de si finalmente se lleva a cabo esa actuación o no; aunque hay que puntualizar que nunca se actúa sobre zonas que no aparezcan a tratar ningún año en ninguno de los 16 escenarios del componente técnico.

Si el algoritmo decide que se va a actuar en una zona, la identificación de qué celdas se tratan dentro de ella depende a su vez de un parámetro que recibe este simulador y que indica qué otros años van a ser tenidos en cuenta para la actuación, lo que se llama el **horizonte de actuación**.

Este horizonte puede emplazarse a 0, 1, 2 o 3 años, en función de cuántos años interesa adelantar los trabajos. Si el horizonte es 0, en la zona sólo se tratarán las celdas que el componente técnico indique que hay que tratar ese año. Si toma valor 1, se tratarán todas las anteriores, más todas las celdas que determine el optimizador que pueda tratar el año siguiente. Esta es la **lógica de funcionamiento en función del horizonte** (**Figura 4**) donde el número de cada celda es el año en el que se tiene que tratar y las celdas marcadas son las que se tratan según los diferentes horizontes. Lo que el optimizador no hace en ningún caso es tratar celdas que carecen de actuación para ninguno de los 4 años.

<table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td></td></tr><tr><td></td><td>3</td><td>3</td></tr></table>	2	2	4	1	1			3	3	<table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td></td></tr><tr><td></td><td>3</td><td>3</td></tr></table>	2	2	4	1	1			3	3	<table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td></td></tr><tr><td></td><td>3</td><td>3</td></tr></table>	2	2	4	1	1			3	3	<table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td></td></tr><tr><td></td><td>3</td><td>3</td></tr></table>	2	2	4	1	1			3	3
2	2	4																																					
1	1																																						
	3	3																																					
2	2	4																																					
1	1																																						
	3	3																																					
2	2	4																																					
1	1																																						
	3	3																																					
2	2	4																																					
1	1																																						
	3	3																																					
horizonte=0	horizonte=1	horizonte=2	horizonte=3																																				

Figura 4. Lógica de funcionamiento en función del horizonte en un ejemplo de zona de optimización.

Cada uno de los escenarios anteriores tiene un coste total asociado que se puede dividir en las diferentes partidas que intervienen en el precio final de la ejecución de trabajos a realizar en una zona (en el caso de que el optimizador decida ir a dicha zona). En concreto el coste se desglosa en las siguientes tres categorías:

- **Costes de desplazamiento:** Son los costes derivados del traslado del personal y maquinaria necesarios para realizar una intervención, desde la base más cercana a la zona en el que se van a realizar los trabajos.

- **Costes de ejecución:** Son los costes derivados de la ejecución de los propios trabajos de poda, tala o desbroce, una vez la maquinaria y el personal ya se han desplazado al apoyo o vano correspondiente.
- **Costes de retirada de madera:** Son los costes añadidos que han generado residuos de madera que necesitan ser retirados cuando se realizan tareas de poda o tala.

Cada comunidad autónoma presenta una casuística diferente en los costes derivados de cada tipo de actuación según las características del terreno y la vegetación (costes de ejecución). Así mismo, se han definido otras tarifas específicas para obtener los costes de desplazamiento y de retirada de madera de cada comunidad.

El sistema optimizador desarrollado ha sido concebido como una herramienta flexible que permite generar planes de actuación de acuerdo a diferentes configuraciones iniciales.

Por un lado, permite ejecutar solo el componente técnico y obtener planes de trabajo no optimizados en caso de que se ejecute con la opción ***predict***. Además, se ha añadido la posibilidad de elegir la configuración para correr el algoritmo, es decir, qué subprioridades se ejecutan cada año, qué celdas procesar (según zonas reglamentarias o según zonas de desbroce) y qué permisos considerar.

Por otro lado, se puede ejecutar el algoritmo optimizando este plan haciendo uso de la opción ***optimize***. A la hora de encontrar un plan optimizado, puede elegirse si se desea encontrar el plan óptimo sin límite de presupuesto, o bien añadir restricciones para que el coste del plan no sobrepase un límite anual o un límite global para los cuatro años de ejecución. Y también se puede limitar el tiempo de las actuaciones, indicando el número máximo de jornadas que se pueden abarcar. En este caso, al igual que en el plan no optimizado, se puede elegir qué configuración de subprioridades, celdas y permisos considerar.

De acuerdo a estas posibles configuraciones de ejecución, se pueden distinguir cuatro tipos de planes de actuación:

- **Planes de actuación del componente técnico del algoritmo:** Estos planes se obtienen ejecutando el sistema con ***predict***, de manera que se obtienen de manera exclusiva planes con la configuración deseada (subprioridades, zonas reglamentarias, zonas de desbroce y permisos) que simulan el crecimiento de la vegetación y tienen en cuenta cuestiones técnicas y legales, pero no económicas.
- **Planes de actuación optimizados sin restricciones presupuestarias:** Estos planes pueden adelantar los trabajos propuestos por el componente técnico. Puesto que no hay restricciones presupuestarias, estos planes contemplan la realización de todos los trabajos propuestos por el componente técnico con la configuración deseada de forma optimizada. Esto implica que en algún momento a lo largo de los cuatro años del plan todos los trabajos necesarios se realizan, sin importar su importancia, en el orden más conveniente para disminuir costes.
- **Planes de actuación optimizados con restricciones presupuestarias anuales:** En estos planes con restricciones anuales, además de adelantar trabajos el optimizador va a cumplir con ese techo de gasto y, por tanto, puede ocurrir que con la configuración deseada el coste supere el presupuesto total y el optimizador necesite obviar la realización de algunos trabajos. En ese caso el optimizador toma los costes de cada zona de optimización para cada uno de los 16 planes posibles, teniendo en cuenta si para cada zona de optimización y plan se pueden adelantar, retrasar o descartar trabajos. De esta forma, iterando zona a zona, se va eligiendo el plan de trabajo que implique menos costes y menor número de trabajos descartados, de acuerdo a la importancia de la zona de optimización y garantizando siempre que no se alcanza el presupuesto máximo año a año.
- **Planes de actuación optimizados con restricciones presupuestarias globales (4 años):** La casuística es muy similar al plan con restricciones anuales, pero en este caso el optimizador establece un presupuesto global y descarta los trabajos de menos importancia en caso de no cumplir con el presupuesto total.

La formulación matemática del problema con límites globales (Figura 5) es la siguiente:

$$\begin{array}{ll} \min_x & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_i^t(s_i^t)x_i^t + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \lambda_{l_i^t}(s_i^t)(1 - x_i^t) \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_i^t(s_i^t)x_i^t \leq B \\ \sum_{i=1}^N r_i^t(s_i^t)x_i^t \leq R \quad \forall t \in [1, T] \\ x_i^t \in \{0, 1\} \quad \forall t, i \end{array} \right. \end{array}$$

Figura 5. Formulación matemática de optimización con límites globales.

El primer término del objetivo da cuenta de los costes de los tratamientos planificados a través de todos los períodos de tiempo y todas las zonas de optimización.

El segundo término en el objetivo verifica, para todos los períodos de tiempo y zonas, si hubo alguna recomendación del componente técnico que no fue cumplida por el plan sugerido. Si es así, una penalización λ_j se aplica, que depende de la clase de prioridad j de la zona sin tratar. Se asume que $\lambda_0 = 0$, por lo que la penalización solo se aplica si el componente técnico sugiere un tratamiento pero no estaba planeado por el optimizador. En cualquier caso, estas penalizaciones no son fácilmente cuantificables y se terminan reduciendo a un conteo de casos desfavorables.

La primera restricción asegura que el presupuesto B no sea superado por la suma de los costes de todas las tareas planificadas, para todos los intervalos de tiempo y zonas de optimización.

La segunda restricción asegura que la capacidad máxima de recursos R no sea superada por la suma de los recursos requeridos de todas las tareas planificadas en todas las zonas. Esto se comprueba para cada paso de tiempo.

La última restricción establece que las tareas en una zona de optimización y un período de tiempo en particular son decisiones binarias: o planificamos un trabajo para esa zona y hora o no.

Salidas del algoritmo VEGETA

La salida del algoritmo está compuesta por tres informes en formato tabla con diferentes campos según el nivel de detalle de las asignaciones del algoritmo:

- **Informe celdas:** Los campos se indican a nivel de celda, es decir, por el identificador propio de cada celda. Estos campos se dividen en tres grupos:
 - o Constantes a lo largo de los años.
 - o Anuales de los que se tienen datos antes de realizar cualquier actuación (comienzan en el año 0) y se van calculando los años posteriores (hasta finalizar el año 4).
 - o Anuales que se van calculando al actuar (desde el año 1 hasta finalizar el año 4).

Al ser una cantidad considerable de campos y poder realizar un análisis de las variables que se consideren más relevantes, en la entrada al algoritmo se pueden seleccionar dichas variables para obtener un informe a nivel de celda más reducido.

- **Informe vanos:** Los campos se indican a nivel de vano, es decir, por el identificador propio de cada vano físico. En este informe se agrupan las celdas que incluye cada vano según diferentes modalidades, tales como total de celdas en el vano, celdas tratadas en cada año, celdas con diferentes propiedades (subprioridades, anomalías, hipótesis de anomalía) en cada año, y el coste total estimado del vano en cada año.
- **Informe zonas:** Los campos se indican a nivel de zona de optimización, es decir, por el identificador propio de cada zona, entendiendo zona de optimización como la intersección de la tesela de cartografía VEGETA con vano. En este informe se

describen para cada año los diferentes costes estimados de la zona de optimización, la importancia máxima asignada a las celdas de la zona y si se realiza actuación en la zona.

Implementación de la solución

Por lo que respecta a la arquitectura y organización interna el código del algoritmo, se ha programado en **Python**, y para que la aplicación esté empaquetada y pueda ejecutarse de manera independiente de la máquina usada, se ha empleado la tecnología **Docker**, que es una de las más populares para encapsular aplicaciones en contenedores que las aíslan de la máquina y el sistema operativo bajo las que corren.

El código cumple con las siguientes especificaciones:

- El algoritmo consta de un componente técnico y un componente optimizador que se concatenan.
- El componente técnico se descompone en cálculo de anomalías y de prioridades. Ambos subcomponentes interactúan iterativamente a lo largo de los 4 años.
- El optimizador económico llama reiteradas veces al cálculo de anomalías y al componente técnico para comparar los costes e implicaciones de los diferentes planes posibles.
- La aplicación funciona de manera independiente y también funciona como parte de un sistema más grande como MANINT (sistema propio de REE). El único requisito que hay que garantizar es que a la aplicación se le proporcione la información esperada de entrada y se invoque mediante los puntos de acceso previstos.
- La comunicación del contenedor Docker con el exterior se realiza a través de APIs REST, tanto por lo que respecta a las entradas como a las salidas.

La solución final del algoritmo VEGETA (Figura 6) sigue el siguiente esquema:

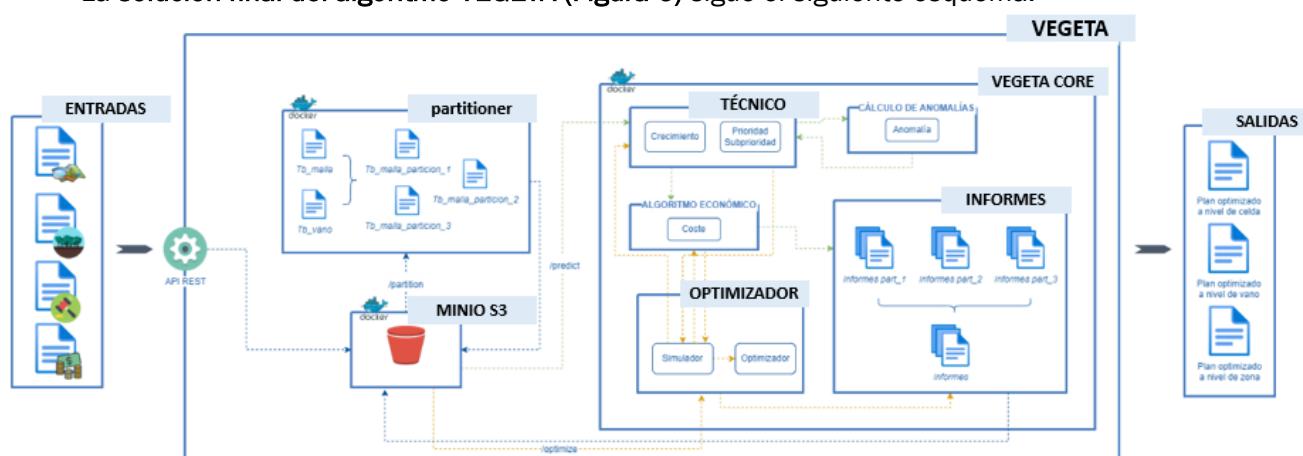


Figura 6. Solución final del algoritmo VEGETA.

4. Resultados

Las predicciones del componente técnico del algoritmo, así como la calidad del dato de la cartografía VEGETA, fueron validadas con éxito en campo por supervisores de REE para las comunidades piloto de Galicia y Extremadura.

Para poder evaluar la aplicación desarrollada y analizar los planes de actuación tanto del componente técnico como del componente optimizador, se ha realizado una división de los vanos que constituyen el ámbito del proyecto en zonas de ejecución, trabajando con empresas contratistas de trabajos selvícolas (en adelante denominadas de tala y poda), que han realizado la validación de los resultados obtenidos para las comunidades autónomas españolas. A continuación, se enumeran dichas zonas de ejecución:

1. Andalucía.
2. Principado de Asturias y Castilla y León.
3. Castilla-La Mancha y Comunidad de Madrid.
4. Cataluña.
5. Comunidad Valenciana y Región de Murcia.
6. Extremadura.
7. Galicia.
8. Islas Baleares.
9. Canarias.
10. Comunidad Foral de Navarra y Aragón.
11. País Vasco, Cantabria y La Rioja.

El procedimiento seguido para el análisis de cada una de estas zonas de ejecución se ha basado en comparar la salida obtenida por el algoritmo VEGETA con la valoración externa de la empresa de tala y poda en relación con la cuantificación de los costes de los trabajos a realizar según dicha salida.

Por otro lado, para poder valorar la capacidad de optimización del plan, se realiza el cálculo del ahorro resultante de los planes de actuación del componente técnico frente a los del componente optimizador. De esta forma, se consiguen los siguientes hitos:

- Evaluar el ahorro económico respecto a:
 - o Optimización de los costes estimados.
 - o Optimización del presupuesto de las empresas de tala y poda.
- Evaluar la correlación de los costes de los planes económicos generados por el modelo con respecto a las valoraciones de las empresas de tala y poda.

A modo de ejemplo se van a mostrar los resultados obtenidos de estas evaluaciones para 400 vanos de la zona de Extremadura:

- o Optimización de los costes estimados: Se muestran los **costes de los planes del algoritmo técnico (sin optimizar) y del algoritmo optimizador (Tabla 1)**:

Tabla 1. Costes de los planes del algoritmo técnico (sin optimizar) y del algoritmo optimizador para 400 vanos de Extremadura.

Coste (M€)	Actuación	Desplazamiento	Madera	Total
Sin optimizar	0,648	0,183	0,041	0,872
Optimizado	0,622	0,154	0,036	0,813

En este caso **el ahorro estimado durante la optimización frente a los planes del componente técnico es del 6,7%**.

- o Optimización del presupuesto de las empresas de tala y poda: Se muestran los **presupuestos de la empresa de tala y poda de los planes del componente técnico y del componente optimizador (Tabla 2)**:

Tabla 2. Presupuestos de la empresa de tala y poda de los planes del componente técnico y del componente optimizador para 400 vanos de Extremadura.

Coste (M€)	Actuación	Desplazamiento	Madera	Total
Sin optimizar	0,716	0,157	0,036	0,910
Optimizado	0,640	0,142	0,021	0,804

En esta ocasión **el ahorro “real” del presupuesto de la empresa de tala y poda estimado durante la optimización frente a los planes del componente técnico es del 11,6%**.

- o Correlación de los costes del algoritmo VEGETA con respecto a las valoraciones de las empresas de tala y poda (Tabla 3):

Tabla 3. Correlación de los costes del algoritmo VEGETA con respecto a las valoraciones de las empresas de tala y poda para 400 vanos de Extremadura.

Coste (M€)	Actuación	Desplazamiento	Madera	Total
Diferencia (%)	-5,35	13,55	10,55	-4,14
Correlación	0,957	0,794	0,822	0,957

En este caso se comparan los costes proporcionados por el algoritmo VEGETA frente a la valoración de la empresa de tala y poda. Se comprueba que **las correlaciones de costes totales superan el 95%**, y que **la diferencia entre estos costes es menor al 5%**.

5. Discusión

Tanto la realidad del algoritmo generado como los resultados obtenidos en la validación de los planes del algoritmo implantados en el sistema MANINT, demuestran que la solución adoptada responde a las necesidades a las que REE quería dar respuesta.

REE cuenta ya con una herramienta flexible, versátil y dinámica para planificar y optimizar en tiempo y coste los tratamientos de la vegetación presente bajo sus líneas de alta tensión.

Como principales ventajas o beneficios de esta aplicación destaca que:

- Permite identificar automáticamente dónde, por qué, cuándo y cómo actuar para cumplir todos los requisitos a los que está sometido este tipo de trabajos, minimizando los costes en diferentes escenarios. Ello redundaría evidentemente en un ahorro de costes y en una inversión más rentable y mejor orientada.
- Como consecuencia de lo anterior, se va a minimizar la eliminación de la vegetación con criterios técnicos y mejores prácticas de gestión; y con ello se garantiza la disminución del riesgo de propagación de incendios forestales, la conservación de especies y hábitats, y la mejora de la biodiversidad. Todo ello contribuiría a la conservación del medio natural, a la reducción de emisiones y a la lucha contra el cambio climático, es decir, a apostar por un compromiso de sostenibilidad.
- Además, la concepción de la aplicación posibilita el seguimiento a tiempo prácticamente real de los trabajos planificados y ejecutados, y del estado en el que se encuentra la vegetación.
- A lo que se suma un diseño abierto y de variables parametrizables que hace posible realimentarla y explorar diferentes planes en función de esta parametrización.
- Y ello motiva que sea exportable y replicable a nuevas líneas.
- En cuanto a su implantación, conlleva dar el salto al mundo digital de estos trabajos y su integración en el sistema MANINT, y ello implica que podrá interactuar con otras aplicaciones y procesos del sistema y abrirse a nuevas prestaciones.
- Y por último, el desarrollo del algoritmo ha permitido al mismo tiempo ahondar en el conocimiento de la dinámica de la vegetación. También ha contribuido a conocer mejor las necesidades y la problemática particular que viven los diferentes territorios que gestionan las líneas eléctricas, así como los costes asociados a esta gestión. Y ambos aspectos van a ayudar muy positivamente a la hora abordar los trabajos de mantenimiento y de firmar nuevos convenios de colaboración con las administraciones para la gestión de la vegetación.

Por su parte, como posibles debilidades o limitaciones cabe señalar que:

- Al tratarse de terrenos que constantemente están sometidos a trabajos selvícolas, la aplicación requiere de datos fiables y actualizados periódicamente de forma masiva. Ello implica tener que realizar labores de toma de datos de inspecciones y vuelos Lidar, así como de procesamiento y control de esos datos, lo que puede suponer un coste de mantenimiento del mismo.

- En relación con la supervisión de los trabajos en campo durante la ejecución que habitualmente realiza REE, puede requerir de personal especializado con conocimientos forestales, para realizar una supervisión de los trabajos bien fundamentada y una correcta actualización de los datos para su entrada en VEGETA.
- Y a ello se une el hecho de que la planificación a escala celda o zona de optimización, si bien proporciona un dato de máxima precisión, puede generar dificultades a las empresas contratistas a la hora de acometer los trabajos a esta escala.

6. Conclusiones

En resumen, gracias a la colaboración de un equipo multidisciplinar de profesionales capaces de dar respuesta a los diferentes requisitos y retos que presentaba este proyecto, ha sido posible desarrollar, alimentar e implantar el algoritmo VEGETA para la gestión óptima de la vegetación bajo líneas eléctricas.

La aplicación cumple con todos los objetivos para los que fue diseñada, y ha superado los controles a los que ha sido sometida hasta la fecha.

Se trata de una aplicación con un enorme potencial, que va a redundar en beneficios económicos y ambientales para REE, para los ecosistemas naturales españoles y para la sociedad en su conjunto.

7. Agradecimientos

Agradecer a Red Eléctrica de España la oportunidad que nos ha dado a todos los colaboradores de participar en este proyecto tan enriquecedor. Ha sido un gran reto técnico y profesional, y no hubiera sido posible asumirlo ni llevarlo a término sin la impecable dirección por parte de REE y Elewit, y sin la gran contribución, profesionalidad y motivación de todos los participantes.

8. Bibliografía

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. 2020. Plan Nacional de Ortofotografías Aéreas. Ministerio de Fomento. Serie publicación digital. Madrid.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 1997 -2021. Inventario Forestal Nacional. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Serie publicación digital. Madrid.

MONTERO, G.; LÓPEZ LEIVA, C.; RUIZ-PEINADO, R.; LÓPEZ-SENESPLEDA, E.; ONRUBIA, R.; PASALODOS, M. 2020. Producción de biomasa y fijación de carbono por los matorrales españoles y por el horizonte orgánico superficial de los suelos forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1-256. Madrid.